

ディーゼル機関に水エマルジョン燃焼法を適用した場合の燃焼促進効果に及ぼす燃料性状の影響

その他（別言語等） のタイトル	Influence of Fuel Properties on the Combustion in Diesel Engine Driven by the Emulsified Fuel
著者	塚原 実, 吉本 康文, 早川 友吉, 村山 正
雑誌名	室蘭工業大学研究報告．理工編
巻	10
号	2
ページ	355-368
発行年	1980-11-27
URL	http://hdl.handle.net/10258/3723

ディーゼル機関に水エマルジョン燃焼法を適用した場合の 燃焼促進効果に及ぼす燃料性状の影響

塚 原 実, 吉 本 康 文*
早 川 友 吉, 村 山 正**

Influence of Fuel Properties on the Combustion in Diesel Engine Driven by the Emulsified Fuel

Minoru Tsukahara, Yasufumi Yoshimoto*,
Tomokichi Hayakawa and Tadashi Murayama**

Abstract

The authors show what influence the properties of various emulsions composed of high-viscosity oil in particular and used as fuel have on the engine performance.

When water to gas oil emulsion, water to A heavy oil emulsion and these containing a small quantity of methanol are used as fuel, the concentrations of NO_x, smoke and CO as well as the specific fuel consumption can be improved similarly to the results previously obtained, whereas the HC concentration increases. Although the NO_x concentration can be remarkably reduced by means of water to C heavy oil emulsion, the specific fuel consumption cannot be so remarkably improved as expected and tends, on the contrary, to increase at retarded injection timing.

On the other hand, the evaporation time of various fuel droplets and the combustion time of the fuel spray on heating flat plate are measured under atmospheric pressure in order to investigate the combustion-promoting effect of emulsified fuel. As a result, it can be confirmed that the W/O emulsion composed of gas oil and water much more decreases the evaporation time in the spherical evaporation region than gas oil only. Between water to C heavy oil emulsion and C heavy oil only, on the contrary, no remarkable difference in evaporation time is observed within the spherical evaporation region, especially at high temperature.

1 ま え が き

先に筆者らは、直接噴射式ディーゼル機関において、水・軽油エマルジョン燃料を使用した場合には、NO_x濃度の低減が期待できる一方、燃料消費率、および排気吐煙の大幅な改善が可能であることを報告した^{(1)~(4)}。本研究においては、これに引続いて、燃料として各種のエマルジョンを使用した際に、その性状が機関性能に対して如何なる影響を及ぼすかについて、とくに重質油に焦点を絞って検討を行った。

* 北海製缶kk, ** 北海道大学工学部 教授

その結果、水・軽油エマルジョン、水・A重油エマルジョン、ならびにこれに少量のメタノールを加えた燃料を使用した場合には、先の報告で得られた結果と同様に、NO_x、吐煙濃度、CO、および燃料消費率の改善が得られる一方、HCが増加するという結果が得られた。しかし、水・C重油エマルジョンの場合には、NO_x濃度の大幅な低減が得られる一方、燃料消費率の改善に関しては、期待したほどの効果は認められず、遅噴射時期においては逆に燃料消費率が増加する傾向が示された。

一方、実機による実験とは別に、エマルジョン燃料による燃焼促進の効果を把握するために、大気圧のもとで、加熱平板における各種の単一液滴の蒸発時間と、噴霧の燃焼時間とについての測定を行った。その結果、軽油と水とのW/O形エマルジョンでは、軽油のみの場合と比較して球状蒸発領域における蒸発時間が大幅に減少することがわかった。これに対して、水・C重油エマルジョンの場合には、C重油のみの場合と比べて、球状蒸発領域、とくに高温領域においては、蒸発時間に顕著な変化は認められなかった。以下、その詳細について報告する。

2 実験装置および方法

2. 1 供試機関および燃料噴射系統

実験に使用した機関は、たて形水冷単気筒の直接噴射式ディーゼル機関であり、機関および燃料噴射系統の諸元を表1に示す。またその燃焼室断面および燃料噴射方向を、図1に示す。機関の運転に際しては、冷却水温度 $80^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、潤滑油温度 $45^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ に調整し、機関回転速度 1,200 rpm 一定のもとに運転を行った。また、動力の吸収には交流電気動力計を使用した。

2. 2 測定装置

インジェクタ線図の測定には、ストレンゲージ式の指圧計を使用し、噴射弁リフト、および

表1 供試機関および燃料噴射系統の諸元

名 称	久保田1LC
シ リ ン ダ 数	1
シ リ ン ダ 径	110 mm
行 程 容 積	1425 cc
公 称 出 力	10 ps
回 転 速 度	1200 rpm
圧 縮 比	17.4
燃 焼 室 形 式	直接噴射式BIP形
噴 射 ポ ン プ	Bosch A形
噴 射 ノ ズ ル	DN4SD128(スロットル形)
ノ ズ ル 開 弁 圧	200 kg/cm ²

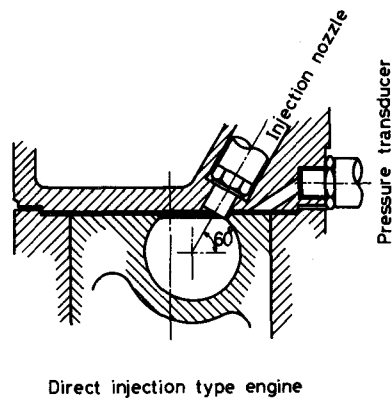


図1 燃焼室断面

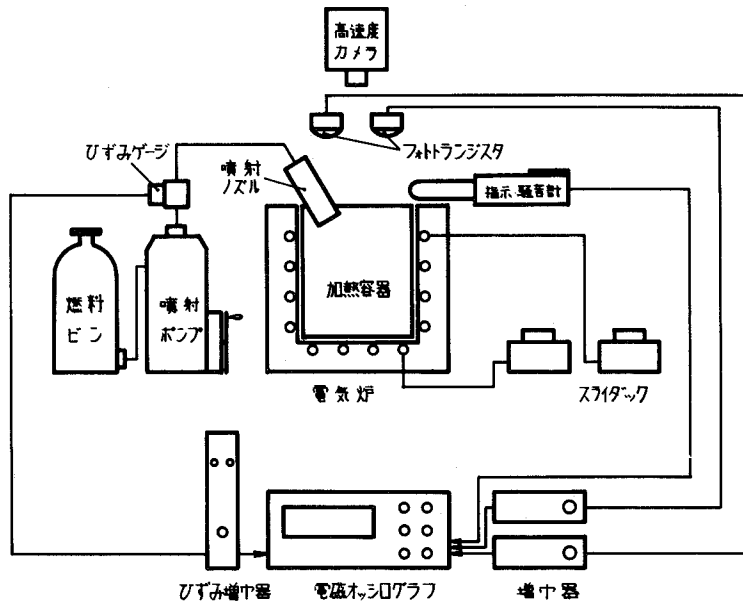


図2 噴霧燃焼実験装置

クランク角度は、フォトランジスタにより検出して、これらを4現象シンクロ스코ープに入力して観測・記録した。排気ガス中の NO_x の測定には、CLA, HCについてはFIA, COの測定にはエレクトロケミカルCO計をそれぞれ使用した。

2. 3 開放型の噴霧燃焼実験装置

大気圧下におけるエマルジョン燃料噴霧の燃焼状況を調べたが、その装置の概略を図2に示す。実験に用いた容器は、内径155mm、高さ110mmの円形開放型であり、周囲と底部に加熱用のヒータを設け、スライダックによって容器壁面と雰囲気温度の調整を行った。燃焼期間は、火炎が発生してから消滅するまでの時間と見做し、フォトランジスタにより測定を行った。なお、フォトランジスタの高温雰囲気における性能低下を防ぐために、二重のガラス管構造とし、内部にフォトランジスタを設け、外側をウオータジャケットにすることによって水冷した。また着火遅れは、噴射開始から火炎が発生するまでの時間と見做し、噴射ポンプの吐出管に取付けた圧力変換器によって、噴射開始時を測定した。なお、測定に当っては、いずれも100回の噴射を行い、その平均値を求めた。

2. 4 供試燃料

供試燃料としては、市販されているもので表2に示す性状をもつ軽油、A重油、およびC重油と水との混合、ならびにこれらに少量のメタノールを加えたエマルジョンをそれぞれ使用した。エマルジョンの作製方法はすでに前報⁽¹⁾において報告したとおりである。すなわち、軽油の場合には、燃料に対して1%の乳化剤（イオネットS-2, HLB=6）を添加し、管内混合

表2 供試燃料の性状

燃 料	軽 油	A 重油	C 重油
比重(15°C)	0.827	0.831	0.937
引火点 °C	71	76	90以上
粘度 RW	32(30°C)	37.5(30°C)	142.8(70°C)
流動点 °C	-25	-19	5
残留炭素分 wt %	0.01	0.04	8.0
高位発熱量 kcal/kg	11100	10930	10490

器（東レ・ハイミキサー）を用いて水と燃料とを混合することによって、エマルジョンを作製したが、水／軽油の比率が0.8 (wt.) 以下のものについては、12 日間の放置に対して5%以下の分離率をもつ、比較的安定なエマルジョンをうることができた。これに対してA重油の場合には、軽油の場合と同様な方法でエマルジョンを作製した際に、分離率が最小になるような水とA重油との適当な混合割合が存在し、本実験においては、水／A重油の比が0.52 (wt.) のものが最も安定性がよく、11 日間の放置に対して3%の分離率に抑えることができた。一方C重油に関しては、水／C重油の比率が0.46 以下のエマルジョンでは、乳化剤を添加しない場合においても、2 週間の放置に対してほとんど分離しないという良好な安定性を示した。しかしC重油の場合には、流動性が悪いために燃料を加熱する必要がある。本実験においては、燃料を70°C に加熱して用いたが、この場合には水とC重油の分離が促進される傾向にある。図3は、水・C重油エマルジョンにおいて、作製後7日間放置した場合の分離率に及ぼす乳化剤の添加割合と放置温度との影響を示したものである。図から明らかなように、分離率は、燃料温度が70°C の場合には大きな値

となるが、乳化剤を添加することによって低下することがわかる。したがって本実験においては、水・C重油エマルジョンの場合にも1%のイオネットS-2を添加したものを使用した。なお、これらの水・燃料エマルジョンにおいて、水に対して10~25%程度のメタノールを添加することによって、分離率を増加させることなく、粘度および流

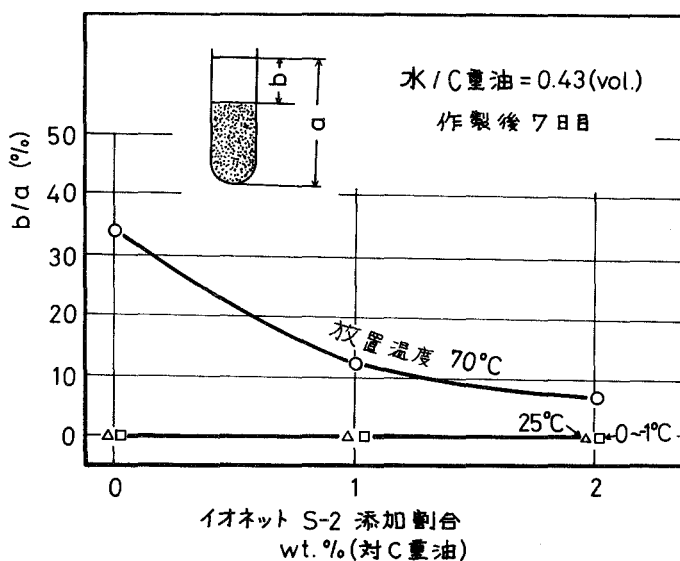


図3 水/C重油エマルジョンの分離率

動点を改善することが可能である。たとえば、水／軽油＝0.52 エマルジョンの粘度および流動点はそれぞれ 43 RW (30°C)、および -16°C であるものが、水に対して 25% のメタノールを添加したメタノール・水・軽油エマルジョンでは 40 RW (30°C)、および -32°C まで低下させることができた。

3 実験結果および考察

3. 1 燃料噴射時期を変化させた場合の機関性能について

図 4 および図 5 は、BMEP=5.3 kg/cm² (定格出力) 一定のもとに、燃料噴射時期を変化させた場合の燃料消費率および排気ガス濃度について、A 重油と水／A 重油＝0.52 wt. エマルジョン、および C 重油と水／C 重油＝0.46 wt. エマルジョンとで、諸性能値の比較を行ったものである。

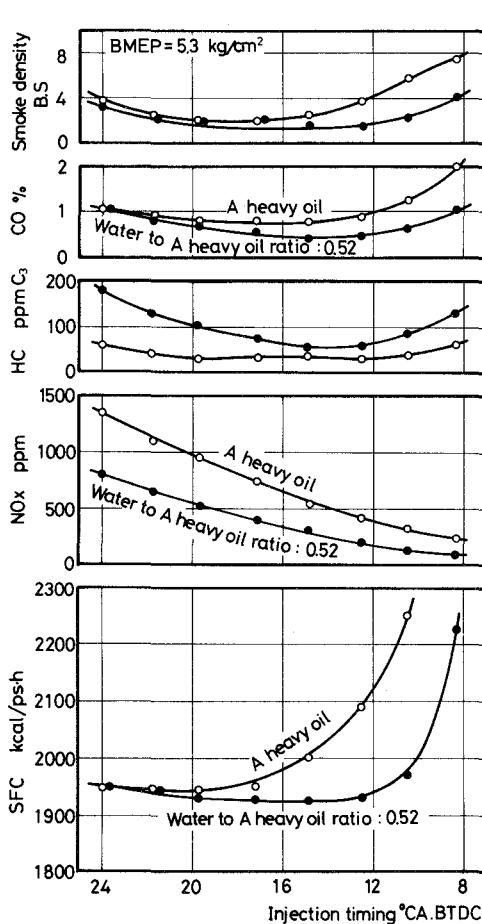


図 4 (a) A 重油エマルジョンを用いた際の機関性能

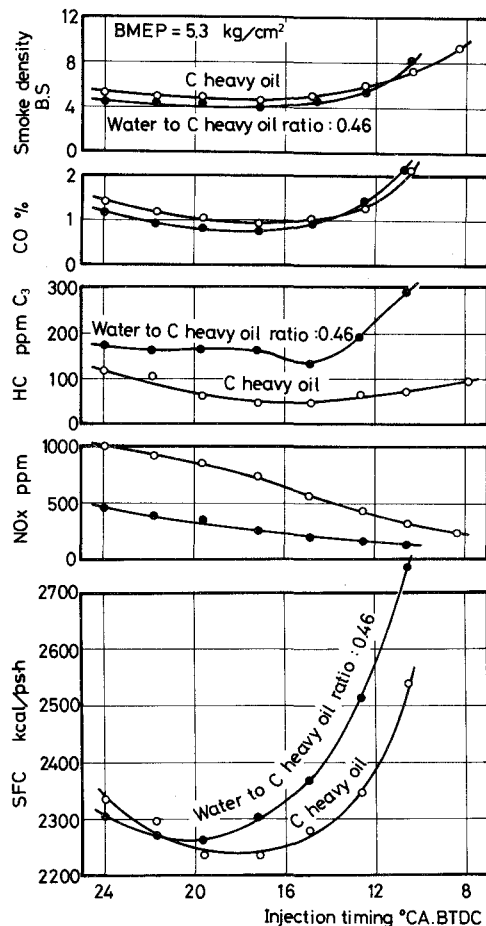


図 5 (a) C 重油エマルジョンを用いた際の機関性能

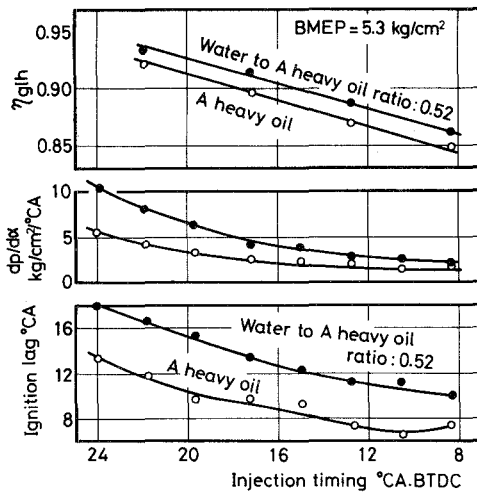


図4 (b) 燃焼特性値

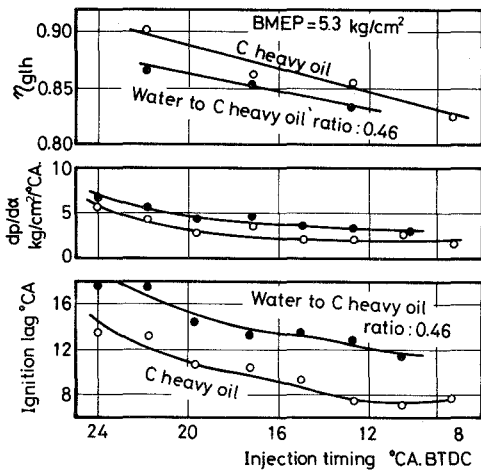


図5 (b) 燃焼特性値

エマルジョン燃料の場合には、AまたはC重油のみの場合に比較して、NO_x、COおよび吐煙濃度が噴射時期の全域にわたって低減する傾向を示している。ただし、HC濃度はいずれの場合にもエマルジョン燃料の方が増加している。一方、燃料消費率についてみると、水・A重油エマルジョンは、A重油のみの場合に比較して燃料消費率の低減が得られており、とくに遅噴射時期においてその傾向が顕著である。なお、水・軽油エマルジョンに関しては、既に詳細な実験を行い、その結果について報告したが、上述のA重油エマルジョンの場合と同様な結果が得られている。これに対して水・C重油エマルジョンの場合には、C重油のみの場合に比較して、燃料消費率が逆に増加の傾向を示している。

なお、燃焼特性値について比較を行ってみると、図4(b)、および図5(b)に示すように、エマルジョン燃料の場合には、いずれも着火遅れが大きいために最大圧力上昇率が大きくなり、燃焼が衝撃的に行われていることが明らかである。しかし等容度に関しては、A重油の場合にはエマルジョン燃料の方が大きな値を示すのに対して、水・C重油エマルジョンでは、C重油のみの場合に比較して、逆に小さい値を示していることが認められる。

3. 2 水/C重油の比率を変化させた場合の燃料消費率とNO_x濃度について

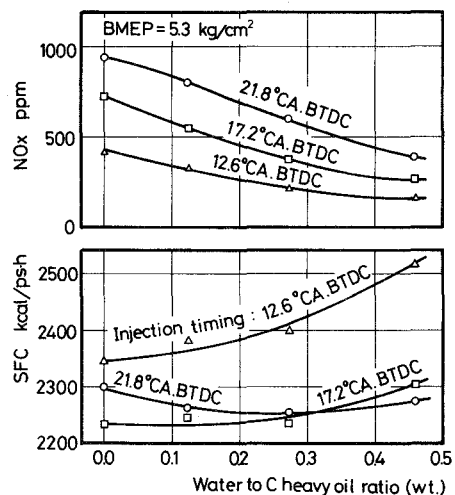


図6 水/C重油の比率と燃料消費率

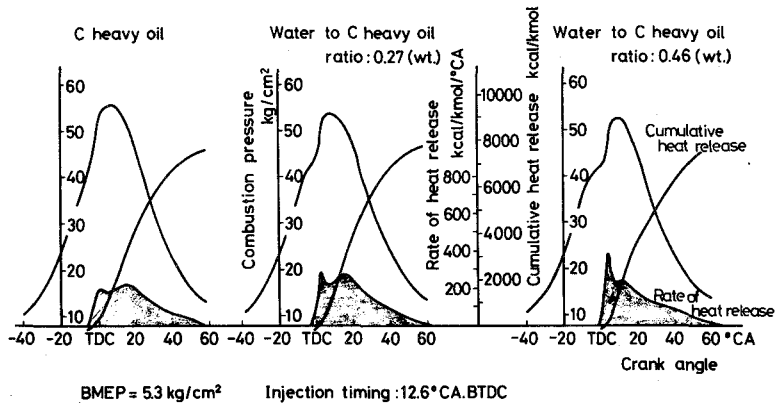


図7 インジケータ線図の一例

図6は、 $BMEP=5.3 \text{ kg/cm}^2$ 一定のもとで、エマルジョン中の水/C重油の比率を変化させた場合の、燃料消費率と NO_x 濃度とを示したものであり、図7は、この場合のインジケータ線図の一例である。いずれの噴射時期においても、水/C重油の比率を増加するにつれて NO_x 濃度は減少する。しかし燃料消費率については、比較的早い噴射時期であって、しかも水/C重油の比率が0.1~0.3の範囲において、C重油のみの場合と比較して、やや低減の傾向が示されているものの、遅噴射時期では逆に大幅な増加を示している。

3.3 メタノール・水・軽油エマルジョンの燃料消費率と排気ガスについて

図8は、(メタノール+水)/軽油=3/7 (vol.)一定の条件のもとで、水に対するメタノールの比率を変化させた場合の燃料消費率と排気ガス濃度とを示したものである。

メタノール・水・軽油エマルジョンでは、水・軽油エマルジョンに比較して、 NO_x 濃度および CO 濃度がやや増加する傾向が見られるが、燃料消費率、 HC および吐煙濃度はほとんど変わらない値を示している。したがって、水・燃料エマルジョンにおいて、水に対して10~25%程度のメタノールを添加することは、エマルジョンの安定性を損うことなしに、流動性

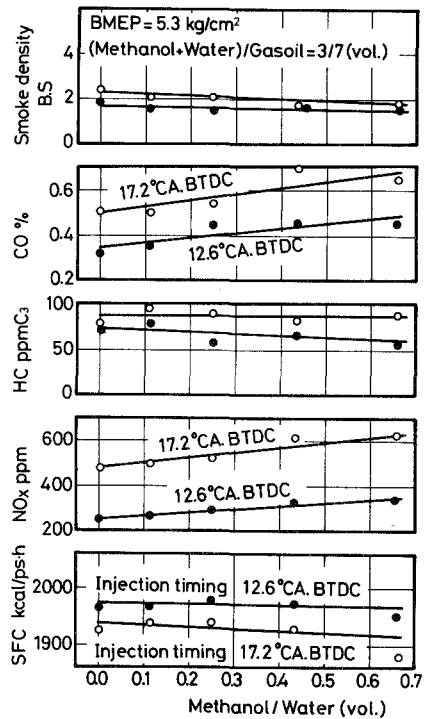


図8 メタノール・水・軽油
エマルジョンの機関性能

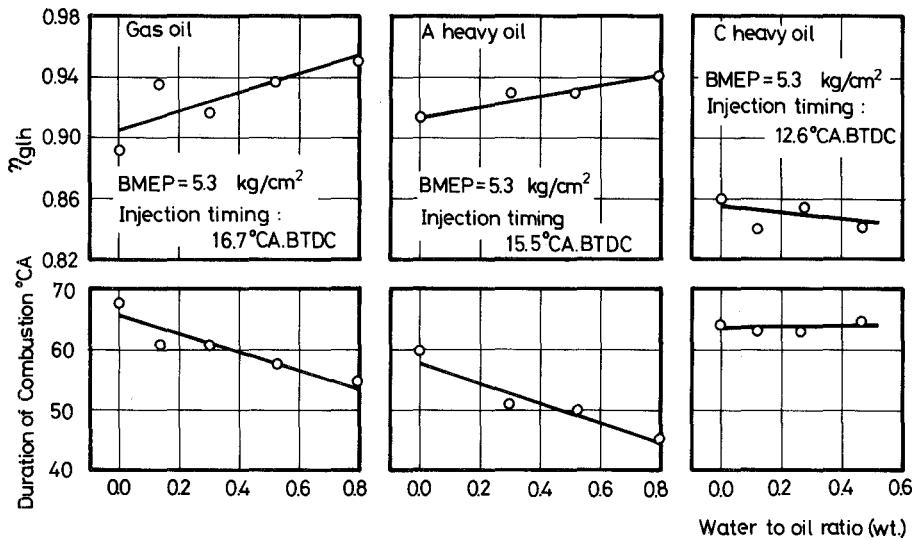


図9 燃焼期間と等容度

および粘度の改善が得られるので、エマルジョン燃料の改質法として有効な一手段と考えられる。

3. 4 各種のエマルジョン燃料を用いた場合の燃焼期間と等容度の比較

図9は、軽油、A重油、およびC重油エマルジョンにおいて、水の含有比率を変化させた際の、燃焼期間と等容度とについて示したものである。

軽油、およびA重油エマルジョンでは、水の比率が増すにつれて燃焼期間が短縮し、等容度が増加していることがわかる。これに対してC重油エマルジョンの場合には、水の比率の増加に対して燃焼期間はほとんど一定であり、等容度はむしろ低下の傾向を示し、軽油およびA重油の場合に比べて、燃焼期間が長く、等容度は小さい値となっている。

軽油、およびA重油と水とのW/O形エマルジョン燃料を使用した際に、燃料消費率の低減が得られる理由としては、つぎのことが考えられる。

(1) エマルジョン燃料をシリンダ内に噴射した際に、W/O形エマルジョン燃料中の微細な水の粒子が急速に気化して、体積膨張を行うために、燃料油滴を微細化し、空気との混合を促進するので、広域にわたって燃焼がすみやかに行われるようになることが考えられる。このことは、図9に示されるように、燃焼期間の短縮ならびに等容度の増加が得られていることから、推察することができる。なお、後述の図18に示すように、実機における実験とは別に、開放容器を用いた噴霧の燃焼状態を観察した結果によると、エマルジョン燃料の場合には、燃焼初期から中期にかけて火炎の広がりが大きく、燃焼がすみやかに終了していることがわかる。しかし、このような水爆発の効果は、高压状態のもとでは起こりにくいという実験結果も得られており^{(5),(6)}、一方、C. K. Lawのエマルジョンの単一液滴モデルにおける理論解析によると、高沸点燃料エマルジョンの使用ならびに高压状態のもとでは、顕著な水爆発効果が期待できること

を予想している⁽⁷⁾。したがって、エンジンにおけるエマルジョン燃焼の水爆発効果に関しては、今後なお、十分な検討が必要である。

また、燃費率の改善が得られるその他の理由としては、

- (2) 噴霧の運動量および貫徹力の増加による噴霧束内への空気のみき込み効果
- (3) 水の含有による噴霧内の局所空気過剰率の増大
- (4) 着火遅れの増加による予混合燃焼量の増加
- (5) 燃焼温度の低下、および輝炎の減少による冷却損失の低減
- (6) 燃焼温度の低下による熱解離傾向の抑制
- (7) 燃焼生成ガスのモル数増加

などが考えられる。

なお図 10 は、和栗らの噴霧の運動量理論⁽⁸⁾に基づき、エマルジョン燃料と軽油のみの場合における噴霧の到達距離、および噴霧内平均空気過剰率の割合を求めて、それぞれ、 X_E/X 、 λ_E/λ で示したものである。図中①は同一噴射系の場合であり、②は同一噴射期間の場合を示す。図より、エマルジョン燃料の使用によって、到達距離および噴霧内平均空気過剰率が増大することがわかる。

図 11 は、エマルジョン燃料を使用した際の冷却水による損失を軽油に対する割合で示したものであり、冷却水出口温度が 70°C の場合には、水/軽油=0.52 エマルジョンは、軽油に比べて約 25～30%の低減が得られる。

図 12 は、空気過剰率を変えた場合の燃焼時におけるガス組成について示したものである。この場合の燃料はセテンとし、燃焼時の生成物については、CO、CO₂、H、H₂、H₂O、N、N₂、NO、O、O₂、および OH の 11 種を仮定して、平衡式と質量バランスおよびエネルギー保存式から計算によって求めた。図から明らかなように、水・セテンエマルジョンの場合には、セテンのみの場合に比べて、空気過剰率の全域にわたって、CO、NO、OH、Hが低い濃度を示し、逆に H₂O は高い値を示す。

図 13 は、水/セテンの割合に対する断熱火炎

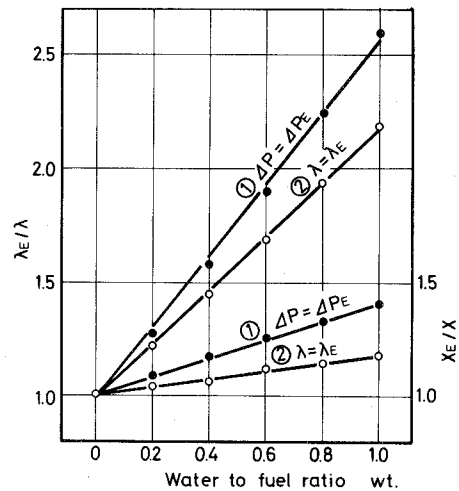


図 10 噴霧の到達距離と空気過剰率

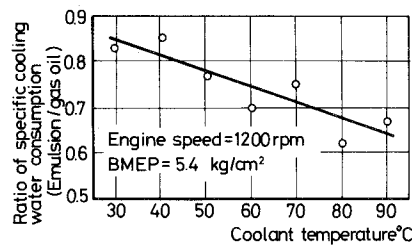


図 11 冷却水損失

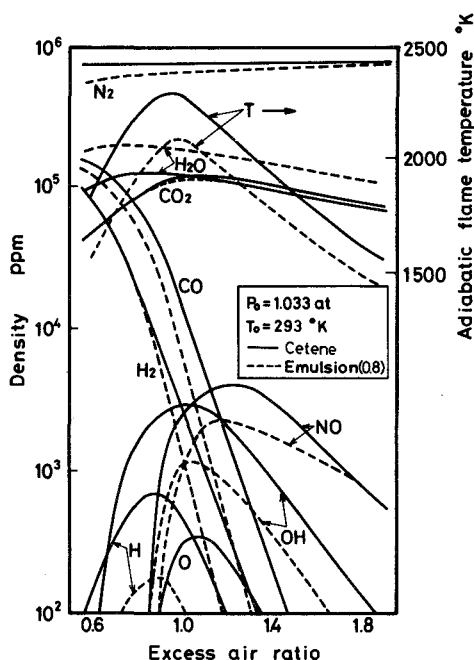


図12 燃焼ガスの組成

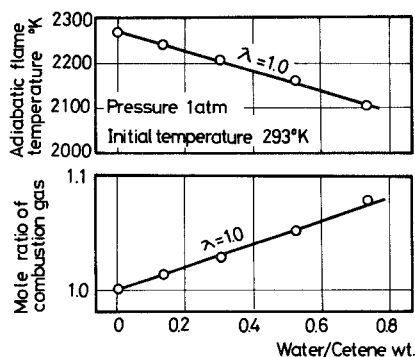


図13 断熱火炎温度と燃焼ガスモル数

温度および燃焼ガスのモル数の比を示したものであり、 $\lambda=1.0$ において、水／セテン＝0.52 (wt.) エマルジョンは、セテンに比べて約 100 °C の温度降下が得られるとともに、モル数の比率は約 1.05 となることがわかる。

エマルジョン燃料を使用した際に、以上のよう燃費率低減の理由が考えられるのであるが、これらのうち、とくに(1)～(4)の効果によれば、燃焼室内における噴霧燃料と空気との混合が促進され、燃焼がすみやかに行われるため、燃焼期間が短縮し、等容度の増加が得られるものと考えられる。

しかし一方、C重油エマルジョンでは、図9によって明らかなように、燃焼期間の短縮および等容度の増大が得られていない。このことに関しては、つぎのように考えられる。

すなわち、C重油エマルジョンは、上記の中で(2)～(7)については軽油およびA重油エマルジョンと同様な効果が考えられるのであるが、供試機関のような小さい燃焼室をもつエンジンにおいては、とくに有効である(1)の水爆発が十分に行われていないことに起因すると思われる。そこで燃料の性状によって水爆発効果が異なるかどうかについて調べるために、大気圧のもとで、加熱平板における単一燃料液滴の蒸発時間、および開放容器を用いて噴霧の燃焼時間の測定をそれぞれ行ってみた。

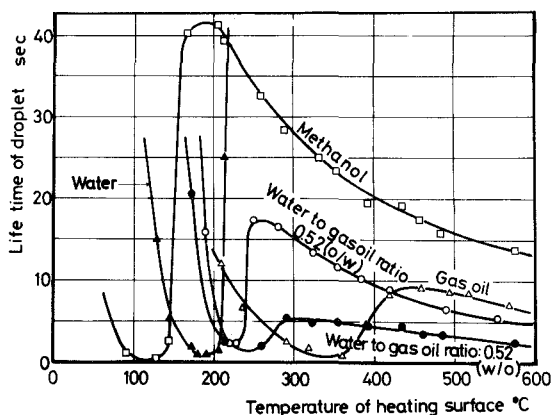


図14 液滴の蒸発時間

3. 5 加熱平板における単一液滴の蒸発時間の測定について

測定に用いた加熱平板は、170 φmm, 厚さ 15 mm の円形ステンレス鋼であり、中心部に直径 30 mm, 深さ 2 mm の凹部をつけて燃料液滴の飛び出しを防いでいる。液滴は、2 cc のピペットを用いて、加熱板の直上約 20 mm の位置より 26~29 mg の量を滴下させて、ストップウォッチにより、10 回の平均値として蒸発時間を求めた。

図 14 は、水、メタノール、軽油、O/W形およびW/O形の軽油エマルジョンの蒸発時間をそれぞれ示したものである。図においてW/O形エマルジョンはO/W形エマルジョンに比較して、加熱面温度 230°C 以上の遷移領域、および球状蒸発領域における蒸発時間が短縮していることが認められる。

図 15 は、軽油とW/O形軽油エマルジョン、およびC重油とW/O形C重油エマルジョンの蒸発時間

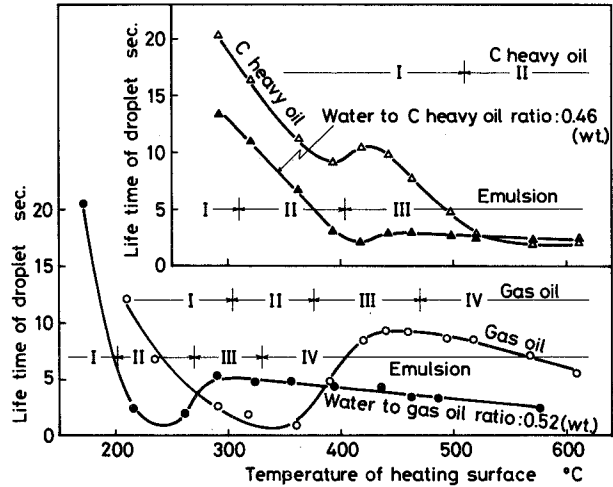


図 15 軽油およびC重油エマルジョン液滴の蒸発時間の比較

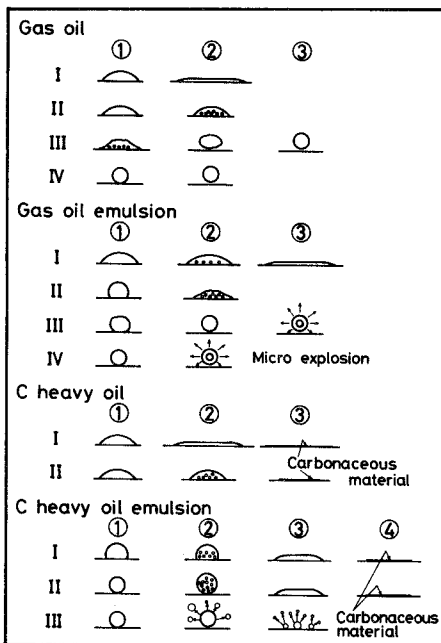


図 16 液滴の蒸発形態

を、それぞれ比較して示したものである。また、肉眼ならびに 8 mm カメラによって観察したそれぞれの蒸発形態を、図 16 に示す。以下区間毎に蒸発形態の説明を加える。すなわち、

C重油区間I：滴下時は、図 16 における①のように、すぐ凸レンズ状に広がり、②のように膜状となる。この状態でしばらく蒸発を続け、蒸発終了時には、③のように炭素状固形物質が残る。

C重油区間II：①の状態で滴下した燃料は、周囲に広がらず、②のように内部に気泡を発生しながら急速に蒸発して、③のように炭素状固形物質が残留する。

水・C重油エマルジョン区間I：滴下時は、①のようにほぼ半球形であり、その後内部に気

泡を発生しながら蒸発し（このとき「ジュー」という音を発するので水分の蒸発と思われる）、その後③のような膜状に移行し、蒸発終了時には④のように炭素状固形物質が残る。

水・C重油エマルジョン区Ⅱ：滴下時は、①のように球形であり、その後内部に気泡を発生しながら、②のように球が膨張する。この膨張・収縮を何度かくり返して燃料内の水分が蒸発し終ったところで、③のように液膜状になり、最後に④の状態となる。

水・C重油エマルジョン区Ⅲ：滴下時は球形で、すぐに②のようにさまざまな大きさに分裂する。このとき「バチバチ」という分裂音を出す。この分裂した滴は壁面に残っているものもあり、とびだすものもある。蒸発終了時には炭素状固形物質も飛散してほとんど残留しない。以上のように、この区間では燃料内の水分による水爆発が生じているのが認められたが、軽油エマルジョンの場合とは大きな差異が存在した。すなわち、

水・軽油エマルジョン区Ⅳ：滴下時は水・C重油エマルジョンと同様に球形であり、しばらくその状態を保ったのち、②のように目視では観察できないような、一瞬にして微細な滴に分裂して蒸発が終了する。このとき「バチバチ」ではなく「バーン」という爆発音を発するのが特徴であり、水爆発効果が顕著に発生しているものと思われる。

3. 6 開放容器における噴霧の燃焼時間について

図 17 は、図 2 に示した円形の開放容器を用いて、フォトランジスタおよび高速度カメラによって、噴霧の燃焼時間を測定し、軽油およびC重油のみの場合に対する、それぞれのエマルジョンの燃焼時間の割合を求めて、比較を行ったものである。図から明らかなように、水・軽油エマルジョンでは、水/軽油の比率を増すにつれて、燃焼時間が短縮しており、これはまた実機において得られた傾向との間に良好な一致を示している。これに対して水・C重油エマルジョンの燃焼時間は、水の含有比率が少ない場合（0.12）には短縮しているが、水の割合が多くなると（0.46）逆に増加を示している。なお、高速度カメラによって、軽油とエマルジョン燃料との燃焼状態を比較した写真の一例を図 18 に示すが、エマルジョン燃料の場合には、燃焼初期から中期にかけて火炎の広がりが大きく、弾けるような火炎の状態を示し、燃焼がすみやかに終了していることがわかる。

4 結 論

本報告において得られた結果は、おおむね、つぎのとおりである。

(1) 軽油およびA重油のエマルジョン燃料では、NO_x、CO、および吐煙濃度の低減と同時に燃料消費率の改善が得られるのに対して、C重油エマルジョンで

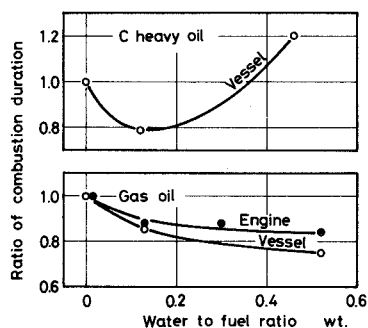


図 17 燃焼時間比

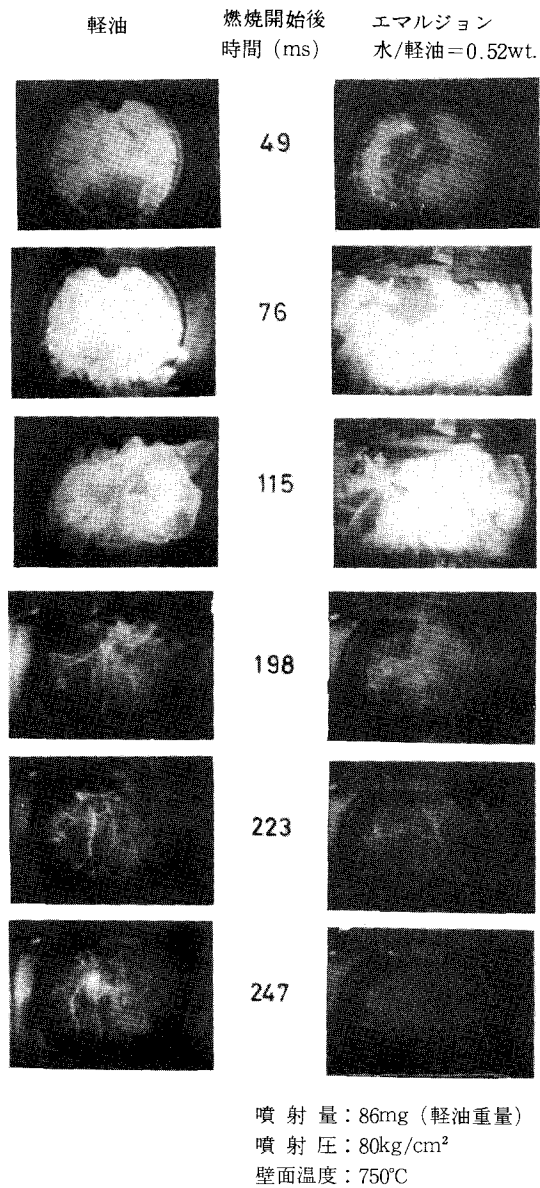


図 18 開放容器における軽油およびエマルジョンの燃焼

は、NO_x, CO, 吐煙濃度の低減は得られるが、燃料消費率に関しては、水の含有割合が少なく（水/C重油=0.1~0.3）、早い噴射時期において、やや改善されるに過ぎない。

(2) C重油エマルジョンは、とくに水の含有比率が大きい場合には、軽油およびA重油のエマルジョンに比べて、水爆発効果が小さく、燃焼期間の短縮が十分に得られない。

(3) 水・燃料エマルジョンにおいて、水に対して10~25%程度のメタノールを添加することは、機関性能ならびにエマルジョンの安定性を損なうことなしに、流動性および粘度の改善が得られるので、エマルジョン燃料の改質法として有効な一手段である。

なお今後、圧力の影響を検討に加えるため、高圧容器における蒸発時間および噴霧の燃焼時間を調べる予定である。おわりに、本実験を行うに当たって協力を頂いた当時本学の学生であった吉村勝美、池端明、徳田達世、中山淳一、および藤村保之の諸氏に対して、感謝の意を表わす次第である。

（昭和55年5月24日受理）

引用文献

- (1) 村山正, 塚原実ほか, 自動車技術会前刷集, 771 (1977-5), 同論文集 No. 16 (1978-11), および SAE Transactions 780224
- (2) T. Murayama, M. Tsukahara et al. Proc. of 2nd Sympo. of Emulsified Fuels in Combustion, TSC. Cambridge, Mass. Sept., 1978.
- (3) 村山正, 塚原実, 宮本登, 吉本康文, 機講論 No. 782-2, (1978-10)
- (4) 塚原実, 吉本康文, 機構論, No. 792-2, (1979-10)
- (5) 三橋一哉ほか, 三菱重工技報, Vol. 15, No. 2, (1978-3)
- (6) 吉本康文, 室蘭工業大学修士論文 (1980-3)
- (7) C. K. Law, Water-in-Fuel Emulsion Conference, U. S. Dept. of Trans., April, 1977
- (8) 和栗雄太郎ほか, 日機論文集, Vol. 25, No. 156, (昭34-8)